

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP04/053515

International filing date: 15 December 2004 (15.12.2004)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 10361464.8
Filing date: 23 December 2003 (23.12.2003)

Date of receipt at the International Bureau: 15 February 2005 (15.02.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 61 464.8

Anmeldetag: 23. Dezember 2003

Anmelder/Inhaber: Endress + Hauser Flowtec AG,
Reinach, Basel-Landschaft/CH

Bezeichnung: Vorrichtung zur Bestimmung und/oder Überwachung
des Volumen- und/oder Massendurchflusses eines
Messmediums

IPC: G 01 F 1/66

Bemerkung: Die nachgereichte Zeichnung mit der Figur 3
ist am 02. März 2004 eingegangen.

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 25. Januar 2005
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

SPD

Vorrichtung zur Bestimmung und/oder Überwachung des Volumen- und/ oder Massendurchflusses eines Messmediums

5

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Bestimmung und/oder Überwachung des Volumen- und/ oder Massendurchflusses eines Messmediums, das eine Rohrleitung in einer Strömungsrichtung durchfliesst, mit 10 zumindest zwei Ultraschallwandlern, die Ultraschall-Messsignale in die Rohrleitung aussenden und aus der Rohrleitung empfangen, und mit einer Regel-/Auswerteeinheit, die den Volumen- und/oder den Massendurchfluss des Messmediums in der Rohrleitung anhand der Laufzeitdifferenz der Ultraschall-Messsignale in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung ermittelt.

Ultraschall-Durchflussmessgeräte werden vielfach in der Prozess- und Automatisierungstechnik eingesetzt. Sie erlauben es, den Volumen- und/oder 20 Massenstrom eines Mediums in einer Rohrleitung berührungslos zu bestimmen.

Bei dem zuvor genannten Laufzeit-Differenz-Prinzip wird die unterschiedliche Laufzeit von Ultraschall-Messsignalen in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung des Mediums ermittelt und ausgewertet. Hierzu werden die 25 Ultraschall-Messsignale von den Ultraschallwandlern wechselweise in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung des Mediums ausgesendet und vom jeweils anderen Ultraschallwandler empfangen. Aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschall-Messsignale lässt sich die Fliessgeschwindigkeit und damit bei bekanntem Durchmesser der Rohrleitung der 30 Volumendurchfluss bzw. bei bekannter oder gemessener Dichte des Mediums der Massendurchfluss bestimmen.

Hinsichtlich der Typen von Messgeräten wird unterschieden zwischen
Ultraschall-Durchflussmessern, die in die Rohrleitung eingesetzt
werden, und Clamp-On Durchflussmessgeräten, bei denen die Ultraschall-
sensoren von aussen an die Rohrleitung mittels eines Spannverschlusses
angepresst werden. Clamp-On Durchflussmessgeräte sind beispielsweise in
der EP 0 686 255 B1, der US-PS 4,484,478 oder der US-PS 4,598,593
beschrieben.

10 Bei beiden Typen von Ultraschall-Durchflussmessgeräten werden die
Ultraschall-Messsignale unter einem vorgegebenen Winkel in die Rohrleitung
bzw. in das Messrohr, in der/ in dem sich das strömende Medium befindet,
eingestrahlt und/oder empfangen. Um eine optimale Impedanzanpassung zu
erreichen, werden die Ultraschall-Messsignale über einen Vorlaufkörper bzw.
15 einen Koppelkeil in die Rohrleitung eingekoppelt bzw. aus der Rohrleitung
ausgekoppelt. Hauptbestandteil eines Ultraschallwandlers ist desweiteren
zumindest ein piezoelektrisches Element, welches die Ultraschall-Messsignale
erzeugt und/oder empfängt.

20 Üblicherweise handelt es sich bei den Ultraschall-Messsignalen, die für die
Volumen- bzw. Massendurchflussmessung verwendet werden, um
breitbandige Pulse. Es versteht sich von selbst, dass gerade bei kleinen
Nennweiten der Rohrleitung bez. des Messrohrs der zeitliche Abstand
zwischen dem ausgesendeten und dem empfangenen Ultraschall-Messsignal
25 relativ klein ist. Um hier eine ausreichende Auflösung und damit eine
zuverlässige Messung durchführen zu können, wird das Messsignal mit einer
Abtastrate abgetastet, die einerseits kleiner ist als die Zeitdauer die zwischen
dem Aussenden und Empfangen eines Ultraschall-Messsignals liegt und die
andererseits so klein ist, dass innerhalb der Messimpulsdauer mehrere
30 Abtastwerte abgetastet werden. Die Abtast- bzw. Samplerate ist folglich relativ
hoch. Die Abtastwerte bzw. die abgetasteten Amplitudenwerte des Ultraschall-
Messsignals werden einem A-/D-Wandler zugeführt. Eine Regel-

/Auswerteeinheit, z.B. eine DSP, verwendet die Samplewerte bzw. die Abtastwerte dazu, das empfangene Messsignal durch eine kontinuierliche Funktion zu interpolieren bzw. möglichst wirklichkeitsgetreu zu rekonstruieren. Mathematisch lässt sich dieser Sachverhalt durch die stetige Funktion $f(t) =$

5 $f(n \cdot T) = a_n$ darstellen, wobei $n = 1, 2, 3, \dots$ - also eine natürliche Zahl - ist und wobei die Koeffizienten a_n die zu den Zeitpunkten $(n \cdot T)$ gemessenen Amplitudenwerte des Ultraschall-Messsignals darstellen.

10 Im einfachsten Fall handelt es sich bei der Funktion um die sukzessive, lineare Verbindung von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Samplewerten / Abtastwerten. Da dieses Verfahren für Messungen mit einer gehobenen Messgenauigkeit im Bereich der Ultraschall-Durchflussmessung nicht ausreichend ist, ist es bekannt geworden, die Lagrange-Interpolation oder die noch komplexere Interpolation nach Levenberg-Markart zur Rekonstruktion 15 des empfangenen Messsignals heranzuziehen.

20 Die beste und wohl exakte theoretische Interpolationsmethode für aus Abtastwerten rekonstruierte Signale besteht fraglos in der Verwendung des Shannon-Nyquist Theorems, wonach sich eine begrenzte kontinuierliche Funktion, z.B. ein Ultraschall-Messimpuls, durch eine unendliche Summe von gewichteten Spaltfunktionen $\sin(x)/x$ darstellen lässt. Die korrekte Formel lautet wie folgt, wobei t als Abkürzung für die Zeit steht und T die Zeitdauer zwischen zwei Abtastwerten repräsentiert:

$$25 f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]}{\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)}$$

Problematisch bei der Anwendung dieser Formel ist, dass die Rekonstruktion des Messsignals nur dann hundertprozentig korrekt ist, wenn die Anzahl der Abtastwerte unendlich ist. Um das Shannon-Nyquist Theorem in der Praxis

anwenden zu können, ist es natürlich erforderlich, die Anzahl der gesampelten Messwerte nach oben zu beschränken. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Anzahl der gesampelten Messwerte gross genug ist, um eine ausreichende und hinreichende Rekonstruktion des empfangenen Messsignals erreichen zu können. Problem hierbei ist eine möglichst kurze Rechenzeit bzw. eine hinlänglich grosse Kapazität des hinter der Regel-/Auswerteeinheit stehenden Mikroprozessors. Bei den heute bekannten Auswerteverfahren für hochgenaue Durchflussmessungen mittels Ultraschall ist der Energiebedarf für die Lieferung von ('Nahezu')-Echtzeitmessungen so gross, dass hier nur Vierdraht-Messgeräte geeignet scheinen. Der Einsatz von sog. Niedrig-Energiegeräten, insbesondere von Zweileiter-Ultraschall-Durchflussmessgeräten, war bislang aufgrund des hohen Energiebedarfs nicht möglich. Wie bereits angedeutet, ist der hohe Energiebedarf vorrangig durch die grosse Rechnerkapazität des Mikroprozessors bzw. der DSP gefordert. Letztlich ist der hohe Energiebedarf eine Folge der aufwendigen Auswerteverfahren, welche für hochdynamische Messungen – insbesondere im Bereich der Echtzeit-Messung – mit hoher Messgenauigkeit erforderlich sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Ultraschall-Durchflussmessgerät mit niedrigem Energieverbrauch vorzuschlagen,

Die Aufgabe wird dadurch gelöst, dass die Regel-/Auswerteeinheit mehrere Abtastwerte (a_i mit $i = 1, 2, 3, \dots$) eines empfangenen Messsignals in definierten Zeitpunkten (t) eines vorgegebenen Zeitbereichs ermittelt, dass die Regel-/Auswerteeinheit den vorgegebenen Zeitbereich des Messsignals durch eine stetige Funktion ($f(t)$) interpoliert, wobei die stetige Funktion ($f(t)$) durch eine Summe einer vorgegebenen Anzahl ($n \in \mathbb{N}$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt eines Abtastwerts mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen

30 Glockenkurve ($e^{-\alpha x^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}$) entspricht. Wie bereits an vorhergehender Stelle erläutert, besteht das Problem mit der Funktion $\sin(x) / x$ darin, dass sie für

praktische Anwendungen viel zu langsam gegen Null konvergiert. Die Funktion $\sin(x)/x$ ist quasi erst bei Minus-Unendlich bzw. bei Plus-Unendlich gleich Null. Durch die Produktbildung mit der schnell abfallenden 5 zuvorgenannten Gauss'schen Glockenkurve kann dieses Problem elegant umschift werden, wodurch die Rechenkapazität der Regel-/Auswerteeinheit ebenso wie deren Energiebedarf erheblich reduziert werden kann. Die Einsparung liegt im Hinblick auf die bislang bekannt gewordenen Verfahren bei einem Faktor, der sich in der Größenordnung von 10 bis 100 bewegt.

10 Gemäss einer vorteilhaften Weiterbildung der erfindungsgemässen Vorrichtung ist vorgesehen, dass die Regel-/Auswerteeinheit zwischen den Abtastwerten zumindest einen zusätzlichen Abtastwert bestimmt und diesen Abtastwerte bzw. diese Abtastwerte durch die stetige Funktion approximiert, wobei die stetige Funktion durch die Summe einer vorgegebenen Anzahl ($n \in N$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt 15 eines Abtastwerts mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen Glockenkurve ($e^{-\alpha x^2}$, $\alpha \in R$) entspricht. Dieses Verfahren ist in anderem Zusammenhang bereits bekannt und trägt den Namen: Oversampling. Durch die Zwischenabtastung und Zwischenwertberechnung lässt sich eine bessere Auflösung des abgetasteten empfangenen Messsignals und damit eine 20 höhere Messgenauigkeit bei der Bestimmung des Volumen- oder Massen- durchflusses erreichen.

25 Weiterhin schlägt eine günstige Ausgestaltung der erfindungsgemässen Vorrichtung vor, dass die Regel-/Auswerteeinheit einen Abszissenwert (t) bestimmt, bei dem ein Ordinatenwert der stetigen Funktion ($f(t)$) einen vorgegebenen Grenzwert erreicht. Bevorzugt handelt es sich bei dem vorgegebenen Grenzwert der stetigen Funktion ($f(t)$) um ein Maximum. Es kann sich jedoch ebenso um einen Nullpunkt, ein Minimum oder um einen 30 Wendepunkt handeln.

Bevorzugt ermittelt die Regel-/Auswerteeinheit anhand der ersten Ableitung $f'(t)$ der stetigen Funktion $f(t)$ den Abszissenwert (t_{max} , t_{min}) im Maximum und/oder im Minimum. Dieser ermittelte Abszissenwert ist nachfolgend jeweils der direkte Bezugswert für die Laufzeit des Messsignals in Strömungsrichtung bzw. entgegen der Strömungsrichtung.

5

10

15

20

25

30

Eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung sieht vor, dass die Regel-/Auswerteeinheit den Abszissenwert (t_{max}), bei dem die stetige Funktion ein Maximum erreicht, durch eine lineare Interpolation der ersten Ableitung der stetigen Funktion ($f(t)$) nach folgender Formel erhält, und wobei t_0 den Abszissenwert einer ersten Schätzung kennzeichnet, bei dem im Zeitintervall ($t_0 - T$, $t_0 + T$) ein Maximum oder Minimum gemessen wird, und wobei $f''(t)$ die zweite Ableitung der stetigen Funktion ($f(t)$) repräsentiert. Mathematisch lässt sich dieser Sachverhalt durch die folgende Formel ausdrücken:

$$t_{max} = t_0 - \frac{f'(t_0)}{f''(t_0)}$$

Im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung wird es als besonders günstig angesehen, wenn die Regel-/Auswerteeinheit zwei Ultrasschall-Messsignale in zwei Zeitbereichen miteinander korreliert, die entsprechende diskrete Abtastung von Korrelationspunkten durch eine stetige Funktion ($f(t)$) interpoliert und den Abszissenwert der stetigen Funktion ($f(t)$) bestimmt, bei dem der Ordinatenwert das Maximum erreicht, wobei der Abszissenwert ein Mass für die Zeitverschiebung zwischen den in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung gesendeten und empfangenen Ultraschall-Messsignale ist. Das Ergebnis dieser Auswertung liefert somit direkt die Zeitdifferenz zwischen den beiden in unterschiedliche Richtungen ausgesendeten und empfangenen Ultraschall-Messsignalen.

Die Messgenauigkeit des Ultraschall-Durchflussmessgeräts hängt entscheidend von der korrekten bzw. optimalen Wahl des Koeffizienten α der Gauss'schen Glockenkurve ab. Um zu gewährleisten, dass der Koeffizient α optimal bestimmt ist, wird er gemäss einer vorteilhaften Ausgestaltung der erfindungsgemässen Vorrichtung in Abhängigkeit von der Anzahl der 5 Messpunkte (MaxSamplei) bestimmt. Insbesondere ermittelt die Rechen-/Regeleinheit jeweils einen optimalen Wert für den Koeffizienten α in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte (MaxSamplei) mittels eines mathematischen Simulationsprogramms.

10 Bevorzugt ist eine Speichereinheit vorgesehen ist, in der jeweils der optimale Wert für den Koeffizienten α in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte (MaxSample) abgespeichert ist. Beispielsweise sind die Werte in einer Tabelle abgelegt. Mit dieser Methode lässt sich wiederum Rechenzeit und Energie 15 sparen, da der jeweilige Wert bei Bedarf einfach aus der Tabelle entnommen werden kann. In Abhängigkeit von der jeweils geforderten Messgenauigkeit und/oder in Abhängigkeit von der momentan zur Verfügung stehenden Energie lässt sich so stets ein optimales Messergebnis erzielen.

20 Aufgrund des geringen Energieverbrauchs ist es möglich, das erfindungsgemäss Ultraschall-Durchflussmessgerät als Zweileiter-Durchflussmessgerät auszubilden. Zweileiter-Technologie bedeutet, dass die Energieversorgung des Geräts und die Messwertübermittlung an eine entfernte Leitstelle und ggf. die Konfigurierung und Parametrisierung des Geräts von der entfernten 25 Leitstelle her über lediglich zwei Leitungen erfolgt. Da die Verdrahtungskosten üblicherweise einen relativ hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen, lassen sich hier beachtliche Einsparungen erzielen. Aufgrund des geringen Energieverbrauchs ist es darüber hinaus auch möglich, das Durchflussmessgerät mit einer internen Energiequelle auszustatten. Die 30 Kommunikation mit einer entfernten Leitstelle kann dann über Leitungen oder drahtlos, z.B. über Funk, erfolgen.

Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren näher erläutert: Es zeigt:

5 Fig. 1: eine schematische Darstellung eines Diagramms, bei dem die abgetasteten Amplitudenwerte des Messsignals gegen die Zeit aufgetragen sind (→ Stand der Technik),

10 Fig. 2: eine schematische Darstellung eines Diagramms, an dem die Arbeitsweise der erfindungsgemässen Vorrichtung visualisiert wird und bei dem die abgetasteten Amplitudenwerte des Messsignals gegen die Zeit aufgetragen sind und

15 Fig. 3: eine schematische Darstellung einer bevorzugten Ausgestaltung der erfindungsgemässen Vorrichtung.

20 In Fig. 1 sind die Amplitudenwerte a_n von sechs Abtastwerten, die im Zeitabstand T abgetastet wurden, gegen die Zeit aufgetragen. Über die gestrichelte Linie ist die lineare Verbindung zwischen zwei Messpunkten dargestellt. Die durchgezogene Kurve $f(t)$ kennzeichnet eine Kurve, die nach einem der bekannten Rekonstruktions-Algorithmen, z.B. nach Lagrange oder nach Levenberg-Markart gefunden wurde. Nachteil der bekannt gewordenen Methoden ist der hohe Rechenaufwand und damit einhergehend der hohe Energieverbrauch der Regel-/Auswerteeinheit bzw. des Mikroprozessors oder der DSP.

25 Erfindungsgemäss ermittelt die Regel-/Auswerteeinheit 11 mehrere Abtastwerte (a_i mit $i = 1, 2, 3, \dots$) eines empfangenen Messsignals in definierten Zeitpunkten (t) eines vorgegebenen Zeitbereichs. Anschliessend werden die Abtastwerte in dem vorgegebenen Zeitbereich durch eine stetige Funktion ($f(t)$) interpoliert, wobei die stetige Funktion ($f(t)$) durch eine Summe einer

vorgegebenen Anzahl ($n \in \mathbb{N}$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt eines Abtastwerts mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen Glockenkurve ($e^{-\alpha x^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}$) entspricht.

5 Im Zeitbereich hat die Formel die folgende Form:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n g\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]}{\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)} e^{-\alpha\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]^2}$$

10 Mittels der zuvorgenannten Berechnung lässt sich eine effiziente und schnelle Interpolation bei relativ geringer Rechnerkapazität erzielen.

15 Betrachten wir den Fall des Oversampling und nehmen an, dass die Oversampling-Rate gleich σ ist, wobei σ eine ganze Zahl und grösser oder gleich 2 ist. Folglich ist jeder Abtastbereich der Zeitdauer T in σ Teil-Abtastbereiche der Zeitdauer T/σ unterteilt.

20 Im folgenden konzentrieren wir uns auf den Zeitbereich $-T/2 < t \leq +T/2$. Selbstverständlich können auch andere Werte von t analog berechnet werden indem der Abtastbereich entsprechend verschoben wird. Die Formel für die Funktion $f(iT/\sigma)$ lautet für i im Bereich: $-(\sigma/2+1) \leq i \leq +(\sigma/2)$, wobei $i \neq 0$ sein muss:

$$25 \quad f\left(\frac{iT}{\sigma}\right) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{i}{\sigma} - n\right)\right]}{\pi\left(\frac{i}{\sigma} - n\right)} e^{-\alpha\left[\pi\left(\frac{i}{\sigma} - n\right)\right]^2} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n c\left(\frac{i}{\sigma}, n\right)$$

$c(i/\sigma, n)$ konvergiert mit wachsendem n sehr schnell gegen Null, so dass in der Praxis die Näherung gemacht werden kann, dass $c(i/\sigma, n)$ gleich Null ist,

sobald der absolute Wert von n einen vorgegebenen Grenzwert erreicht. Dieser Grenzwert hängt letztlich von der geforderten bzw. notwendigen Messgenauigkeit ab und wird nachfolgend als MaxSamples gekennzeichnet. Es hat sich gezeigt, dass eine gewünschte Messgenauigkeit sich in der Praxis erreichen lässt, wenn der Wert von MaxSamples im Bereich von ca. 3 bis 10 liegt.

Damit ergibt sich die folgende Gleichung:

10

$$f\left(\frac{iT}{\sigma}\right) = \sum_{n=-\text{MaxSamples}}^{+\text{MaxSamples}} a_n \cdot c\left(\frac{i}{\sigma}, n\right)$$

Die Koeffizienten $c(i/\sigma, n)$ werden einmal berechnet und dann in einer Tabelle der Grösse $(2 \times \text{MaxSamples} + 1) \times (\sigma - 1)$ abgespeichert. Somit lässt sich nahezu einer Verarbeitung der Messwerte in Echtzeit erreichen.

15

n	$i/\sigma = -0.25$	$i/\sigma = 0.25$	$i/\sigma = 0.5$
-5	X1	X2	X3
.	.	.	.
.	.	.	.
0	Y1	Y2	Y3
.	.	.	.
.	.	.	.
5	Z1	Z2	Z3

Wesentlich ist es, anhand der in einem Zeitbereich T abgetasteten Amplitudenwerte den Zeitpunkt t_{\max} zu ermitteln, an dem ein relater maximaler Amplitudenwert (oder auch ein relater minimaler Amplitudenwert) der Funktion $f(t)$ auftritt. Beispielsweise kann dieser Wert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abtastwerten liegen. Ist t_{\max} bekannt, so ist es auch möglich das tatsächliche Maximum $f(t_{\max})$ (oder Minimum) der Funktion $f(t)$ zu bestimmen.

Die Vorgehensweise ist die folgende (siehe auch Fig. 2): Zuerst wird ein Maximum (oder Minimum) in dem Zeitbereich bestimmt, indem die Abtastwerte miteinander verglichen werden. Nehmen wir an, dass a_0 dem maximalen Wert (oder dem minimalen Wert) entspricht. Zudem wird angenommen, dass mindestens MaxSamples vor und hinter a_0 vorhanden sind. Für praktische Anwendungen liegt der Parameter MaxSamples im Bereich von 3 -10.

5

10 Bei dem Abszissenwert t_{\max} ist die erste Ableitung $f'(t)$ der Funktion $f(t)$ also gleich Null. Die Formel lautet demnach: $f'(t_{\max}) = 0$. Somit ist a_0 das Maximum (oder das Minimum) von dem Zeitbereich bzw. Zeitintervall $[a_1]$, wobei gilt: $-T < t_{\max} < T$.

15 Der Wert t_{\max} lässt sich durch eine lineare Interpolation der ersten Ableitung gemäss der folgenden Formel finden:

$$t_{\max} = -\frac{f'(0)}{f''(0)}$$

20 Wie bereits gesagt wird erfindungsgemäss folgendes Interpolations-Wavelet genutzt:

$$g(x) = \frac{\sin(x)}{x} e^{-\alpha x^2}$$

25 Die erste Ableitung $g'(x)$ und die zweite Ableitung $g''(x)$ der Funktion $g(x)$ lauten:

$$g'(x) = \left[-\frac{\sin(x)}{x^2} + \frac{\cos(x)}{x} - 2\alpha \sin(x) \right] e^{-\alpha x^2}$$

$$g''(x) = \left[2 \frac{\sin(x)}{x^3} - 2 \frac{\cos(x)}{x^2} + (2\alpha - 1) \frac{\sin(x)}{x} - 4\alpha \cos(x) + 4\alpha \sin(x) \right] e^{-\alpha x^2}$$

30

Eine Grenzwertberechnung mit $x = 0$ führt zu $g(0) = 1$, $g'(0) = 0$,

$$g''(0) = (-2\alpha - 1)/3$$

Hieraus ergeben sich für $f(t)$, $f'(t)$, $f''(t)$ folgende mathematischen Gleichungen:

$$5 \quad f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot g\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]$$

$$f'(t) = \frac{\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot g'\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]$$

$$f''(t) = \frac{\pi^2}{T^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \cdot g''\left[\pi\left(\frac{t}{T} - n\right)\right]$$

10

Folglich gilt für $t = 0$

$$f'(0) = -\frac{1}{T} \sum_{n \neq 0} (-1)^n \frac{a_n}{n} e^{-\alpha\pi^2 n^2}$$

15

$$f''(0) = -\frac{1}{T^2} \left[a_0 (2\alpha + \frac{1}{3})\pi^2 + 2 \sum_{n \neq 0} (-1)^n a_n \cdot (2\alpha\pi^2 + \frac{1}{n^2}) e^{-\alpha\pi^2 n^2} \right]$$

$$t_{\max} = -\frac{f'(0)}{f''(0)} = T \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{a_{-n} - a_n}{n} e^{-\alpha\pi^2 n^2}}{a_0 (2\alpha + \frac{1}{3})\pi^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (a_{-n} + a_n) \cdot (2\alpha\pi^2 + \frac{1}{n^2}) e^{-\alpha\pi^2 n^2}}$$

20

Wird weiterhin angenommen, dass nur die Abtastwerte innerhalb des Sub-Zeitbereichs von $a_{-MaxSamples}$ bis $a_{MaxSamples}$ relevant sind, dann wird $a_n = 0$, wenn $|n| > MaxSamples$ ist. Die letzte Gleichung lautet dann:

25

$$t_{\max 1} = T \frac{\sum_{n=1}^{MaxSamples} (-1)^n \frac{a_{-n} - a_n}{n} e^{-\alpha\pi^2 n^2}}{a_0 (2\alpha + \frac{1}{3})\pi^2 + 2 \sum_{n=1}^{MaxSamples} (-1)^n (a_{-n} + a_n) \cdot (2\alpha\pi^2 + \frac{1}{n^2}) e^{-\alpha\pi^2 n^2}}$$

Wenn der Bereich $[a_i]$ in den Bereich $[a_i - a_0]$ vertikal verschoben wird, so lässt sich die zuletzt genannte Formel vereinfachen und man erhält:

$$t_{\max 2} = T \frac{\sum_{n=1}^{\text{MaxSamples}} (-1)^n \frac{a_{-n} - a_n}{n} e^{-\alpha \pi^2 n^2}}{2 \sum_{n=1}^{\text{MaxSamples}} (-1)^n (a_{-n} + a_n - 2a_0) \cdot (2\alpha \pi^2 + \frac{1}{n^2}) e^{-\alpha \pi^2 n^2}}$$

5

Um den optimalen Wert für den Koeffizienten α zu finden, sollte $t_{\max 1} = t_{\max 2}$ gesetzt werden, da sich der Abszissenwert des Maximums bei einer

10 translatorischen Verschiebung nicht ändern sollte, da er gegenüber einer Translation invariant sein müsste. Allerdings ist in der strengen Theorie $t_{\max 1} \neq t_{\max 2}$ (übrigens sogar dann, wenn $\text{MaxSamples} = \infty$ ist). Grund ist, dass die Funktion, die den verschobenen Bereich $[a_i - a_0]$ interpoliert keine einfache Translation der Funktion ist, die den Bereich $[a_i]$ interpoliert. Daher ist die Annahme, dass $t_{\max 1} \approx t_{\max 2}$ ist, nur gültig für das nachfolgend formulierte

15 Residuum:

$$\text{residue}(\alpha, \text{MaxSamples}) = 2\alpha + \frac{1}{3} + 4 \sum_{n=1}^{\text{MaxSamples}} (-1)^n (2\alpha + \frac{1}{n^2 \pi^2}) e^{-\alpha \pi^2 n^2}$$

20 Der absolute Wert von diesem Residuum ist ein Zeichen dafür, wie gut das gewählte Wavelet für den praktischen Gebrauch ist. Die Analyse des Residuums mittels eines Mathematischen Simulationsprogramms (z.B. Mathcad) ermöglicht es, einen optimalen Wert für α für eine vorgegebene Anzahl von $(2 \times \text{MaxSamples})$ um a_0 herum zu finden. Optimale Werte für liegen in der Größenordnung von 0.01 bis ca. 0.04. Wird ein Wert für α eingesetzt, der abseits des optimalen Wertes liegt, so ist die Interpolationsfunktion zwischen zwei Abtastwerten nicht 'glatt', bzw. sie hat signifikante Harmonische jenseits der Nyquist Grenze, aber geringe Abweichungen vom optimalen Wert (z. B. 5%) haben wenig Einfluss auf das Ergebnis. Letzteres zeigt wie gut die vorgeschlagene Vorrichtung zur Durchführung der praktischen Messungen

25

30

geeignet ist. Insbesondere beeinflussen Rundungsfehler das Messergebnis minimal.

5 In Praxis werden zwei Koeffizienten-Tabellen $[c_i]$ and $[d_i]$ ($0 < i \leq \text{MaxSamples}$), aufgebaut. Dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$t_{\max} = T \frac{\sum_{n=1}^{\text{MaxSamples}} (a_{-n} - a_n) c_n}{\sum_{n=1}^{\text{MaxSamples}} (a_{-n} + a_n - 2a_0) d_n} \text{ mit}$$

10 $c_n = -(-1)^n \frac{e^{-\alpha\pi^2(n^2-1)}}{n}$ und $d_n = -2(-1)^n (2\alpha\pi^2 + \frac{1}{n^2}) e^{-\alpha\pi^2(n^2-1)}$

15 Die Koeffizientenbereich $[c_i]$ and $[d_i]$ werden normiert, so dass gilt: $c_1=1$. Der optimale Wert für α , der von der Anzahl der Abtastwerte MaxSamples abhängt, wird in eine Tabelle eingelesen. Die Koeffizienten werden berechnet und in einer Tabelle abgespeichert. Im Betrieb bedeutet das für den Mikroprozessor bzw. die Regel-/Auswerteeinheit des Ultraschall-Durchflussmessgeräts, dass nur einfache Rechenoperationen wie Additionen, 2×MaxSamples Multiplikationen und eine Division durchzuführen sind.

20 25 Wie bereits an vorhergehender Stelle mehrfach erwähnt, wird zur Messung des Durchflusses mittels eines Ultraschall-Durchflussmessgeräts ein Laufzeitdifferenzverfahren angewendet. Ein Ultraschall-Impuls wird in Strömungsrichtung (Up) des Messmediums in die Rohrleitung bzw. in das Messrohr eingestrahlt, von einem Ultraschallwandler empfangen und nachfolgend werden von einem (high-speed) schnellen A-/D-Wandler innerhalb eines vorgegebenen Zeitbereichs mehrere Abtastwerte $[u_{pi}]$ gesammelt. Dasselbe Signal wird dann entgegen der Strömungsrichtung (Down) in die Rohrleitung bzw. in das Messrohr ausgesendet, ebenfalls von einem Ultraschallwandler empfangen und von dem A-/D-Wandler gesampelt. Innerhalb eines

vorgegebenen Zeitbereichs werden ebenfalls mehrere Abtastwerte $[dn_i]$ gesammelt. Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Messsignalen ist proportional zur Fliessgeschwindigkeit des Messmediums in der Rohrleitung. Die beiden Abtastwerte werden miteinander korreliert gemäss der Formel:

5

$$corr_i = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} up_n dn_{n+i}$$

Der maximale Wert dieses Bereichs korrespondiert zu der Zeitdifferenz der 10 beiden zuvorgenannten Ultraschall-Messsignale. Für eine hochgenaue Berechnung des Volumenstroms ist dieses Korrelationsverfahren jedoch viel zu ungenau. Daher wird auf die Korrelationsfunktion das zuvorgenannte erfindungsgemäss Verfahren angewendet.

15 Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung der erfindungsgemässen Vorrichtung in der Ausgestaltung als Inline-Ultraschall-Durchflussmessgerät 1. Das Ultraschall-Durchflussmessgerät 1 ermittelt den Volumendurchfluss bzw. den Massendurchfluss des Messmediums 4, das in Strömungsrichtung (S bzw. Up) in der Rohrleitung 2 fliesst, nach der bekannten Laufzeitdifferenz- 20 Methode.

Wesentliche Komponenten des Inline Ultraschall-Durchflussmesseräts 1 sind die beiden Ultraschallwandler 5, 6 und die Regel-/Auswerteeinheit 11. Die 25 beiden Ultraschallsensoren 5, 6 sind mittels einer in der Fig. 1 nicht gesondert dargestellten Befestigungsvorrichtung in einem Abstand L voneinander an der Rohrleitung 2 angebracht. Entsprechende Befestigungsvorrichtungen sind aus dem Stand der Technik hinlänglich bekannt und werden auch von der Anmelderin angeboten und vertrieben. Die Rohrleitung 2 hat einen vorgegebenen Innendurchmesser di .

30 Ein Ultraschallwandler 5; 6 weist als wesentlichen Bestandteil zumindest ein piezoelektrisches Element 9; 10 auf, das die Ultraschall-Messsignale erzeugt

und/oder empfängt. Die Ultraschall-Messsignale werden jeweils über die Koppelemente 7, 8 der beiden Ultraschallwandler 5; 6 in die vom Medium 4 durchströmte Rohrleitung 2 eingekoppelt bzw. aus der vom Medium durchströmten Rohrleitung 2 ausgekoppelt. Das Koppelement 7, 8 sorgt für eine möglichst gute Impedanzanpassung der Ultraschall-Messsignale beim Übergang von einem Medium in das andere. Mit SP ist übrigens der Schallpfad gekennzeichnet, auf dem sich die Ultraschall-Messsignale in der Rohrleitung 2 bzw. in dem Messmedium 4 ausbreiten. Im gezeigten Fall handelt es sich um eine sog. Ein-Traversenanordnung, in der die Ultraschallwandler 5, 6 angeordnet sind. Eine Traverse kennzeichnet dabei den Teilbereich des Schallpfades SP, auf dem ein Ultraschall-Messsignal die Rohrleitung 2 einmal quert. Die Traversen können je nach Anordnung der Ultraschallwandler 5, 6 und ggf. unter Einfügen eines Reflektorelements in den Schallpfad SP diametral oder chordal in der Rohrleitung bzw. in dem Messrohr 2 verlaufen.

Patentansprüche

5

1. Vorrichtung zur Bestimmung und/oder Überwachung des Volumen- und/oder Massendurchflusses eines Messmediums (4), das eine Rohrleitung (2) in einer Strömungsrichtung (s; Up) durchfliesst, mit zumindest zwei Ultraschallwandlern (5, 6), die Ultraschall-Messsignale in die Rohrleitung (2) aussenden und empfangen, und mit einer Regel-/Auswerteeinheit (11), die den Volumen- und/oder den Massendurchfluss des Messmediums (4) in der Rohrleitung (2) anhand der Laufzeitdifferenz der Ultraschall-Messsignale in Strömungsrichtung (S; Up) und entgegen der Strömungsrichtung (Down) ermittelt,

10 **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) mehrere Abtastwerte (a_i mit $i = 1, 2, 3, \dots$) eines empfangenen Messsignals in definierten Zeitpunkten (t) eines vorgegebenen Zeitbereichs ermittelt,

15 dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) den vorgegebenen Zeitbereich des Messsignals durch eine stetige Funktion ($f(t)$) interpoliert, wobei die stetige Funktion ($f(t)$) durch eine Summe einer vorgegebenen Anzahl ($n \in \mathbb{N}$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt eines 20 Abtastwerts mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen

Glockenkurve ($e^{-\alpha^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}$) entspricht.

25 2. Vorrichtung nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) zwischen den Abtastwerten zumindest einen zusätzlichen Abtastwert bestimmt und diesen Abtastwerte bzw. diese Abtastwerte durch die stetige Funktion approximiert, wobei die stetige 30 Funktion durch die Summe einer vorgegebenen Anzahl ($n \in \mathbb{N}$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt eines Abtastwerts

mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen Glockenkurve ($e^{-\alpha^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}$) entspricht.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2,
5 **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) einen Abszissenwert (t) bestimmt, bei
dem ein Ordinatenwert der stetigen Funktion ($f(t)$) einen vorgegebenen
Grenzwert erreicht.

10 4. Vorrichtung nach Anspruch 3
dadurch gekennzeichnet,
dass es sich bei dem vorgegebenen Grenzwert der stetigen Funktion ($f(t)$) um
einen Nullpunkt, ein Maximum, ein Minimum oder um einen Wendepunkt
handelt.

15 5. Vorrichtung nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) anhand der ersten Ableitung $f'(t)$ der
stetigen Funktion $f(t)$ den Abszissenwert (t_{\max}, t_{\min}) im Maximum und/oder
20 im Minimum bestimmt.

25 6. Vorrichtung nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) den Abszissenwert (t_{\max}), bei dem die
stetige Funktion ein Maximum erreicht, durch eine lineare Interpolation der
ersten Ableitung der stetigen Funktion ($f(t)$) nach folgender Formel erhält, und
wobei t_0 den Abszissenwert einer ersten Schätzung kennzeichnet, bei dem im
Zeitintervall ($t_0 - T, t_0 + T$) ein Maximum oder Minimum gemessen wird, und
wobei $f''(t)$ die zweite Ableitung der stetigen Funktion ($f(t)$) repräsentiert:

$$t_{\max} = t_0 - \frac{f'(t_0)}{f''(t_0)}$$

7. Vorrichtung nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche,
5 **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Regel-/Auswerteeinheit (11) zwei Ultraschall-Messsignale in zwei
Zeitbereichen miteinander korreliert, die entsprechende diskrete Sammlung
von Korrelationspunkten durch eine stetige Funktion ($f(t)$) interpoliert und den
Abszissenwert der stetigen Funktion ($f(t)$) bestimmt, bei dem der
10 Ordinatenwert den Maximalwert erreicht, wobei der Abszissenwert ein Mass
für die Zeitverschiebung zwischen den in Strömungsrichtung (S, Up) und
entgegen der Strömungsrichtung (Down) gesendeten und empfangenen
Ultraschall-Messsignale ist.

15 8. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Rechen-/Regeleinheit (11) jeweils einen optimalen Wert für den
Koeffizienten (α) in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte
(MaxSample) mittels eines mathematischen Simulationsprogramms
bestimmt.

20 9. Vorrichtung nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet,
eine Speichereinheit (12) vorgesehen ist, in der jeweils der optimale Wert für
25 den Koeffizienten (α) in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte
(MaxSample) abgespeichert ist.

Zusammenfassung

5

Die Erfindung bezieht sich auf ein Ultraschall-Durchflussmessgerät (1), das sich durch einen niedrigen Energieverbrauch auszeichnet.

10 Erfindungsgemäss ermittelt die Regel-/Auswerteeinheit (11) mehrere Abtastwerte (a_i mit $i = 1, 2, 3, \dots$) eines empfangenen Messsignals in definierten Zeitpunkten (t) eines vorgegebenen Zeitbereichs und interpoliert die Abtastwerte durch eine stetige Funktion ($f(t)$), wobei die stetige Funktion ($f(t)$) durch eine Summe einer vorgegebenen Anzahl ($n \in \mathbb{N}$) von Wavelets (W) gebildet ist und wobei jedes Wavelet (W) dem Produkt eines Abtastwerts mit einer Spaltfunktion ($\frac{\sin(x)}{x}$) mit einer Gauss'schen Glockenkurve ($e^{-\alpha x^2}$, $\alpha \in \mathbb{R}$) entspricht.

15

(Fig. 2)

20

1/2

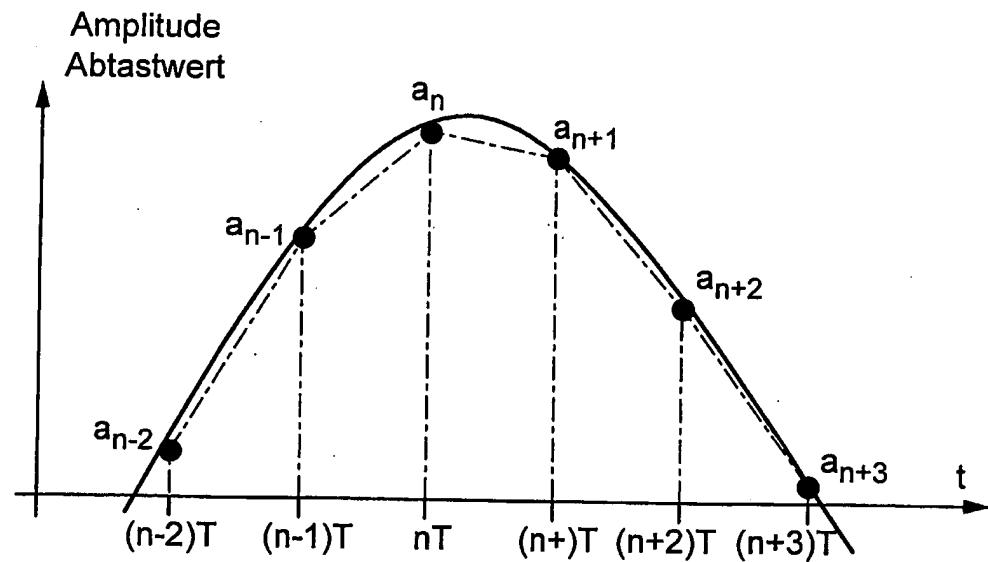


Fig. 1 (Stand der Technik)

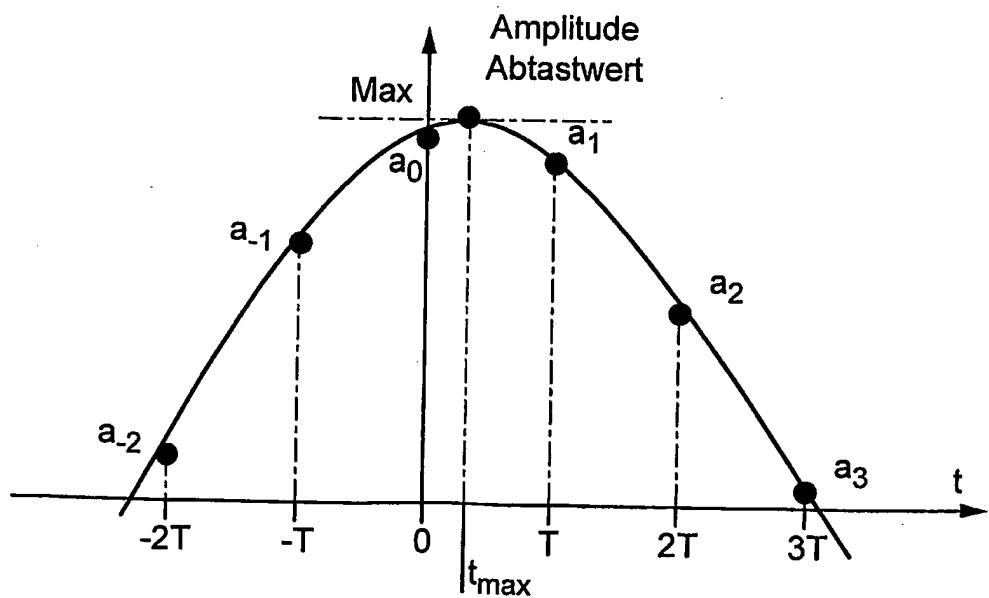


Fig. 2

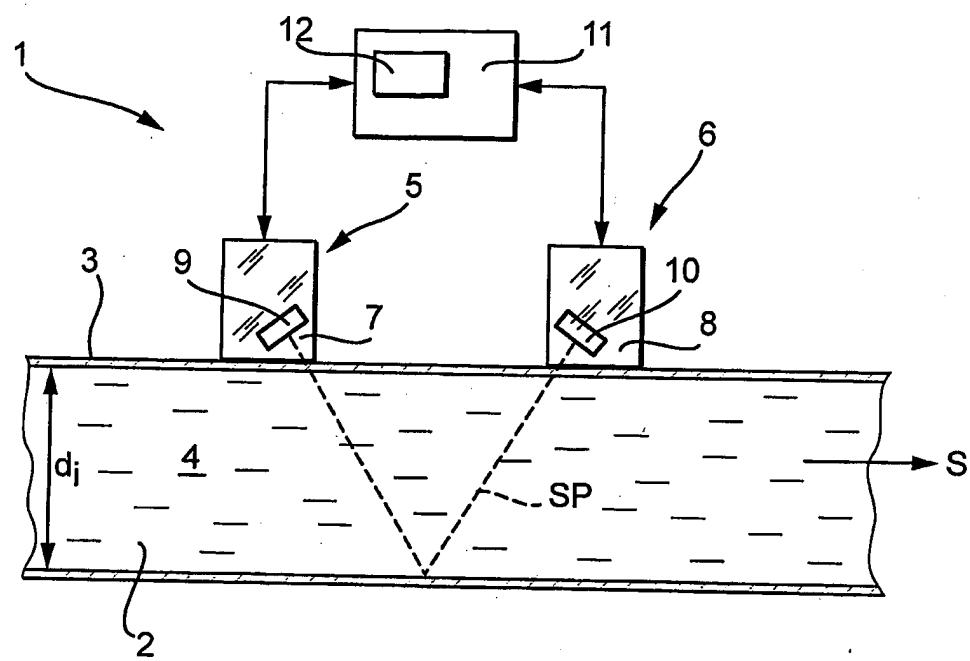


Fig. 3